MAQUINADO DE PERFILES CONTINUOS EN HIERRO FUNDIDO NODULAR FE-50007

Lourival Boehs; Wilson Luiz Guesser; Dilço C. Júnior; Cícero G. Aguiar
Departamento de Engenharia Mecânica
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
Cx. Postal, 476
88049 – 900 – Florianópolis – SC – BRASIL
Fone: (48) 331.9387 r.201; Fax: (48) 234.1519
e-mail: lb@grucon.ufsc.br

RESUMEN

La fabricación de perfiles de hierro fundido nodular, por proceso de fundición contínua, es una tecnología relativamente reciente y tiene como objetivo la mejoría de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de este tipo de material, procurando colocarlas en el mismo nivel de los aceros con propiedades mecánicas equivalentes. Adicionalmente, esos perfiles con diferentes formas de dimensiones comerciales representan una competitividad mayor para la construcción de componentes de las más variadas aplicaciones. Esa importante tecnología de fabricación es dominada por algunos paises, entre ellos Brasil, que produce este tipo de hierro fundido, tanto para el consumo en el mercado brasileño como para el mercado externo. La principal fabricante en Brasil es la Industria de Fundición Tupy Ltda. Frente a la cresciente demanda en el consumo y la diversificación en la aplicación de este material, han aumentado considerábiemente las exigencias de los consumidores en relación al conocimiento de sus características para el maquinado, buscando principalmente respuestas referentes al tipo de herramientas y condiciones de corte económicamente mas apropiadas para su maquinado. Hay usuários que también cuestionan la homogeneidad de perfiles a lo largo de la sección transversal. Preocupada en atender las necesidades se sus clientes, la referida fabrica brasileña, realizó una investigación en conjunto con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina, con el propósito de atender satisfactoriamente las inquietudes mencionadas. La investigación fue realizada en proceso de torneado, utilizando herramientas de metal duro con múltiples capas de revestimiento. Los resultados obtenidos representan una significativa contribución para el maquinado de este hierro fundido y son presentados en este trabajo.

ABSTRACT

The production of nodular cast iron profiles by means of continuous casting is a relatively new technology, having as its main goal to improve mechanical and metallurgical properties of this kind of material; the idea is to bring these properties up to the same level as steel of equivalent (comparable) mechanical properties. Furthermore, those profiles with different forms of commercial dimensions represent a better competitivity for the construction of components of a variety of applications. This important production technology is dominated by a few countries, Brazil among them, producing this kind of cast iron both for consumption in the Brazilian market and abroad. The main producer in Brazil is Tupy Ltda Foundries. Face to the growing consumption and diversified uses of this material, consumers demands have greatly increased as it refers the machining properties. Answers are sought mainly about the type of tools and the more economically adequate cutting conditions for their machining. There are users that also question the homogeneity of the profiles along the cross section. Concerned with answering to its customers' needs and problems, the above mentioned Brazilian foundry conducted a research, jointly with the Federal University of Santa Catarina Mechanic Engineering Department, to better answer the existing questions. Research was conducted on the turning process, using hard metal tools with multiple-layered coating. Results, such as obtained and presented in this work, are a significant contribution for the machining of this cast iron.

Key words: Nodular cast iron; Turning ; Machining; Cutting conditions; mechanical properties;

INTRODUCCIÓN

Entre los procesos de fabricación para la obtención de piezas brutas, con las más diversas formas y dimensiones, se encuentra la clásica fundición en moldes de arena, ampliamente empleada en piezas automovilísticas y en componentes de máquinas y equipos en hierro fundido. Por este proceso la pieza es obtenida casi en su forma final, realizandose apenas operaciones de maquinado en ciertas superficies y zonas. Este proceso, exige la fabricación de herramientas de fundición, generalmente de alto costo, tornandolo adecuado solo para series mediana y grandemente numerosas. Para pequeñas series de piezas, el maquinado a partir de un perfil contínuo constituye una alternativa más flexíble y económica. De este modo, perfiles de diversas clases de hierros fundidos y diversas geometrías, han sido empleados en varios sectores de la industria para la producción de piezas, tales como émbolos de pistones hidráulicos, comandos hidráulicos, moldes de vidrio, engranajes, cojinetes, poleas, tapas de cojinetes y piezas diversas para mantenimiento (Fig. 1). Con esta técnica pueden ser producidas diversas clases de hierros fundidos, atendiendo a diferentes necesidades en lo que se refiere a propiedades mecánicas y térmicas.

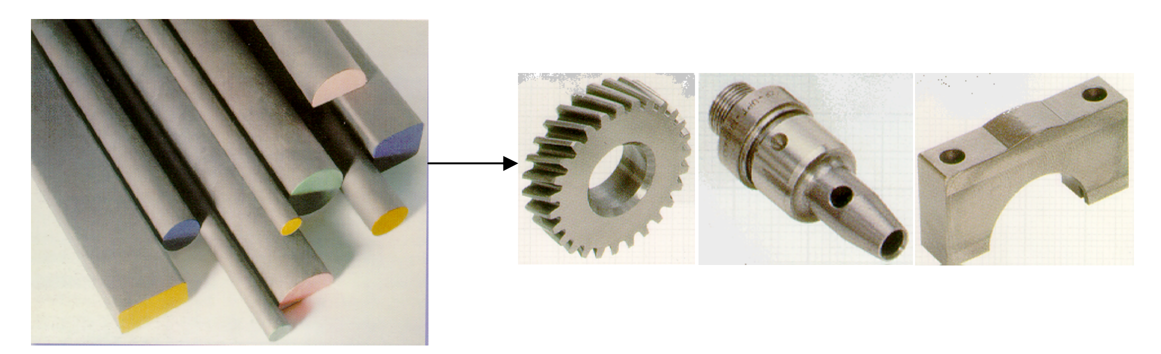


Fig. 1: Ejemplos de piezas producidas a partir de perfiles de hierros fundidos

Así como en la fundición en arena, el modo de solidificación y enfriamiento posterior de la pieza, condiciona una serie de propriedades del producto fundido. En el proceso de fundición contínua, la solidificación ocurre en el interior de una matriz de grafito, circundada por una camisa de agua que origina su enfriamiento, conforme muestra la Fig. 2. Así se verifica que, en los estados iniciales de solidificación, es muy alta la velocidad de enfriamiento (causada por el grafito refrigerado externamente con agua), mientras los estados finales de solidificación se caracterizan por bajas velocidades de extracción de calor (al aire).

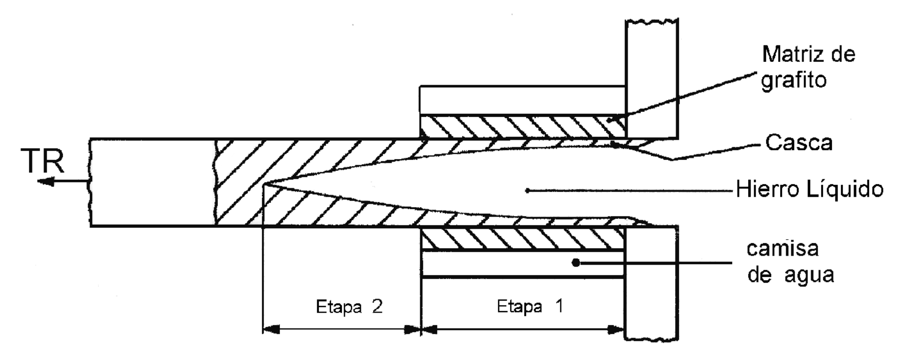


Fig. 2: Esquema del proceso de fundición contínua

De este modo, también la microestructura de un perfil contínuo de hierro fundido nodular presenta variaciones en su sección, consecuencia de las diversas velocidades de enfriamiento. Mientras en la periferia es alto el número de nódulos de grafito, con matriz predominantemente ferrítica, en el núcleo decresce el número de nódulos de grafito y aumenta la cantidad de perlita en la matriz. Aún como consecuencia de la alta velocidade de enfriamiento, ocasionalmente se puede verificar la presencia de algunas islas de cementita junto a la periferia. Esta variación de microestructura puede conducir a diferentes resultados de maquinabilidade del material. Aspecto éste no discutido en la literatura técnica, y que será abordado en el presente estudio.

Además de eso, considerando el contínuo y significativo crescimiento en la utilización de este material por parte de la industria y la falta de un conocimiento técnico-científico más profundo sobre las características de maquinado de hierros fundidos, se objetivó en el presente trabajo estudiar algunas variables del proceso de maquinado, como el tipo de material de herramienta, los parámetros del proceso y el comportamiento de desgaste de las herramientas.

El trabajo experimental fue desarrollado con un hierro fundido nodular de clase ABNT FE-50007, utilizandose el torneado como proceso de maquinado.

CONSIDERACIONES SOBRE EL MAQUINADO DE HIERROS FUNDIDOS

Desde el punto de vista genérico, los hierros fundidos son considerados como materiales que presentan una buena maquinabilidad, o sea, no son muy difíciles de maquinar, especialmente los hierros grises y nodulares de menor dureza y resistencia. El hierro fundido nodular FE-50007 ya es considerado un material que posee mayor dureza y resistencia mecánica, con valores que se aproximan a los de los aceros ABNT 1040/1045. El grafito presente en la microestructura de los hierros fundidos contribuye para la buena maquinabilidad, tanto por el factor de lubrificación de la herramienta como por la discontinuidad que produce en la microestructura y que conduce a la ruptura de la viruta en pequeños segmentos, independientemente del proceso maquinado. Sin embargo, la maquinabilidad de estos materiales, así como la de los aceros, también está fuertemente ligada a los demas microconstituyentes, como ferrita, perlita, martensita, austenita, carburos y densidad de grafito. Algunas refrencias relacionadas con el tema: (SOUZA, 1977), (BOEHS, 1979), (MARGERIE, 1971), (ASTM, 1971), (WALTON, 1971), (KOENIG, 1981), (FATAHALA & HUSSEIN, 1996). A su vez, la composición química también ejerce una grande influencia sobre la maquinabilidad, destacandose los siguientes elementos: carbono y silício, asufre y manganésio, fósforo, estaño y cobre, y cromo. Entre los trabajos que abordan este tema tenemos las siguientes referencias: (SMITH, 1981), (METALS HANBOOK, 1978), (BOEHS, 1979).

Considerando que las características generales de los hierros fundidos obtenidos por la técnica clásica son similares a aquellas pertenecientes a los producidos por fundición contínua, se parte del presupuesto que, en cuanto al aspecto de maquinado, ellos también poseen una cierta similitud. Esta premisa orientó la selección de las herramientas y las condiciones de corte utilizadas para desarrollar el presente trabajo con el hierro fundido nodular FE-50007. Por norma, los fabricantes de herramientas y las investigaciones con hierros fundidos, recomiendan utilizar herramientas de metal duro, pertenecientes a las grandes clases K y P (ISO), para el maquinado de estos materiales. Herramientas de cerámicas, a base de óxido de aluminio o de nitrato de silicio, también vienen siendo utilizadas en escala significativamente cresciente, principalmente cuando el maquinado es realizado en máquinas que posibilitan trabajar con elevadas velocidades de corte, o sea, velocidades mayores a las utilizadas con herramientas de metal duro.

MATERIAL, EQUIPOS Y METODOLOGÍA

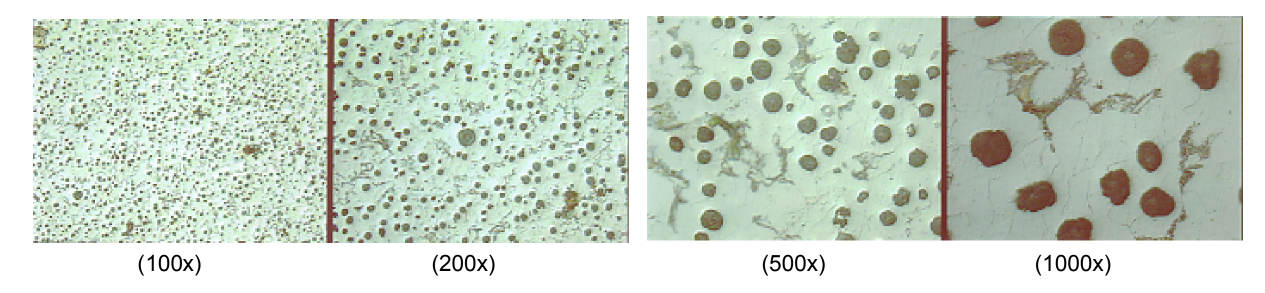
Los ensayos fueron efectuados en muestras extraídas de un perfil redondo, con diámetro de 102 mm, producido en hierro fundido nodular clase FE-50007. Como uno de los objetios de este trabajo fue caracterizar la maquinabilidad en diferentes posiciones a lo largo del radio del perfil, fue entonces inicialmente determinada la dureza y la microestructura en diversas posiciones. Fue selecionada una muestra con presencia de algunas islas de cementita en la capa superficila, de modo a determinar cuantitativamente el efecto nocivo de ese constituyente sobre la maquinabilidad. Estas caracterizaciones constan en la Tabla 1, pudiendo verificar que las propiedades del material satisfacen las exigencias de la clase FE-50007. Los valores de dureza Brinell no se muestran sensibles a la presencia de islas de cementita en la capa periférica, mientras las medidas de dureza Vickers demostraron la presencia de este constuyente de mayor dureza.

Tabla 1: Resultados de dureza y características metalográficas a lo largo del radio del perfil con diámetro de 102 mm, FE-50007

MICROESTRUCTURA DA MATRIZ	DUREZA BRINELL
Ferrita	120
50% ferrita e 50% perlita	150
Perlita gruesa	195
Perlita media	215
Perlita fina	218
Perlita fina con 5% de carburos libres	240

Con relación a la microestructura, es interesante resaltar que mientras la variación de la cantidad de cementita hace suponer una mejora de maquinabilidad a medida que se camina para el centro de la barra, las variaciones de la cantidad de perlita y del número de nódulos de grafito, indicarían el sentido opuesto. Los ensayos de maquinabilidad objetivan entonces aclarar quantativamente esta suposición.

La Fig. 3 representa la microestructura presente en la capa externa.



(100x) (200x) (500x) (1000x)

Fig. 3: Microestuctura de hierro fundido nodular FE-50007, en la profundidad de 3,5 mm. Reactivo: nital a 2%

Se utilizaron tres tipos de metal duro de las clases K y P, denominados: GC 3015 (SNMA 120408) con revestimiento de nitrato de titanio; CG 4015-P15/K15 (SCMT 120408 UR) con capa interna de nitrato de titanio y capa externa de revestimiento de óxido de aluminio y la CG 4025-P25/K20 (SCMT 120408 UM) con capa interna de carbonitrato de titanio y capa externa de revestimiento de óxido de aluminio (SANDVIK Coroman, 1995). Adicionalmente, el trabajo se concentró en investigar mas profundamente la aplicación de la primera herramienta, una vez que según su fabricante (SANDVIK Coroman, 1997), ella es en el momento una de las más indicadas para el maquinado de hierro fundido.

Los experimentos de maquinado fueron realizados en un torno universal rígido, dotado de un variador contínuo de velocidades y potencia de accionamiento de 22 KW. En esta máquina también fue realizado el pre-maquinado de los cuerpos de prueba, removiendo de éstos una capa con espesor del orden de 1,5 mm, de modo a asegurar una mayor homogeneidad en el material de los experimentos. Las fuerzas de corte fueron medidas con el auxilio de un dinamómetro piezoelétrico, fabricado por Kistler-Suiza, modelo 9257D.

Se procuró centrar el foco de la investigación en la optimización de la velocidad de corte, en el análisis de la influencia de la alteración del material a lo largo de la sección transversal de los perfiles, bien como en los diferentes tipos de herramientas de material duro anteriormente enumeradas. Esto llevó a utilizar tres velocidades de corte diferentes, 225, 250 y 280 m/min. El avance y la profundidad de corte fueron mantenidos constantes, respectivamente, 0,2 mm y 2,5 mm. Los experimentos fueron realizados sin el empleo de líquido de corte.

Los desgastes en el flanco y en la cara de las herramientas (ISO 3685, 1977) fueron medidos, analizados y documentados con el auxilio de un microscopio de utillage y con microscopia electrónica de barrido (Philips, modelo XL 30).

Los experimentos para la medición de las fuerzas de corte y fuerzas de avance, fueron realizados con herramientas nuevas, o sea, sin desgaste. Se utilizaron cinco avances, siendo ellos: 0,16; 0,25; 0,4; 0,55 y 0,8 mm. La profundidad de corte fue mantenida constante, en 2,5 mm, y consecuentemente el ancho de corte también se mantuvo constante. La herramienta poseía un ángulo de dirección de filo de 75 grados. En esta serie experimental se empleo solamente la velocidad de corte de 250 m/min.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Fig. 4 a 6 presentan los resultados obtenidos con la herramienta GC3015, registrandose el desgaste del flanco en función del tiempo de maquinado, para las diversas capas del perfil y para las tres diferentes velocidades de corte empleadas. En todos los casos, la forma de las curvas es similar, con un aumento sensible del desgaste a partir 0,2 mm de desgaste. La Fig. 7 ilustra el desgaste típico constatado en el flanco y en la cara de las herramientas de metal duro utilizadas en este trabajo.

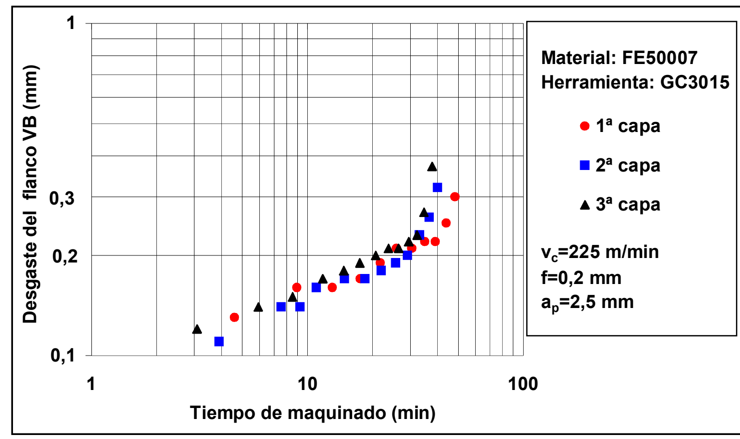


Fig. 4: Curvas de desgaste del flanco en función del tiempo de maquinado, empleandose herramienta GC 3015 y velocidad de 225 m/min

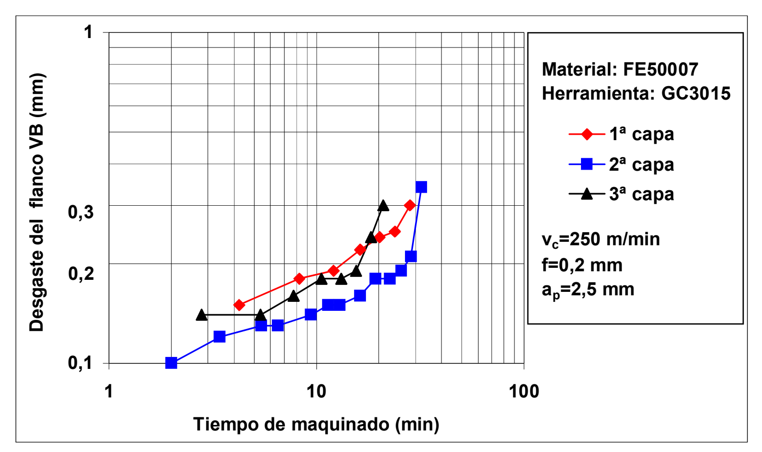


Fig. 5: Curvas de desgaste del flanco em función del tiempo de maquinado, empleandose herramienta GC 3015 y velocidad de 250 m/min

A partir de los resultados de las Figuras 4 a 6 é posible realizar un análisis de la vida de las herramientas para las tres velocidades de corte y para las tres capas del perfil RE-50007. Para tal, se utilizan las curvas de vida según Taylor (ISO 3685, 1977), conforme la Fig. 8. El análisis de esta figura, bien como el de las figuras 4 a 6, permite verificar que, en todas las velocidades de corte probadas, no se constató efecto sensible de la capa maquinada sobre la tasa de desgaste de las herramientas.

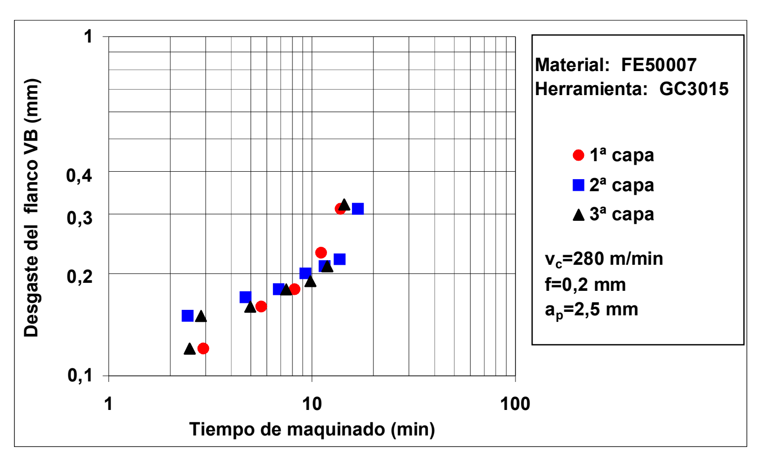
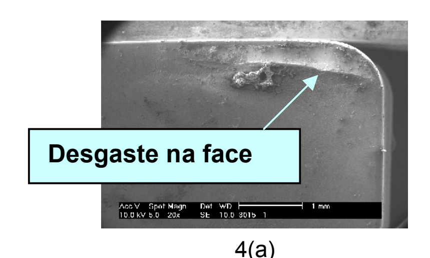
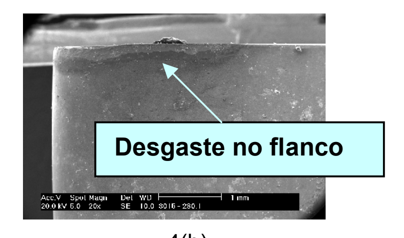


Fig. 6: Curvas de desgaste del flanco em función del tiempo de maquinado, empleandose herramienta GC 3015 y velocidad de 280 m/min





4(a) 4(b)

Fig. 7: GC3015 – Vista de la cara (a) y vista del flanco (b) de la herramienta, 1ª capa, 280 m/min (20x)

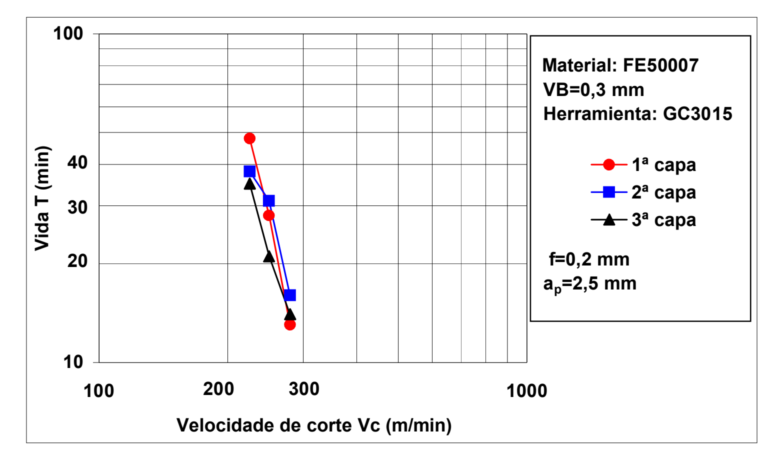


Fig. 8: Curvas de vida para las tres capas del hierro fundido nodular y para las tres velocidades de corte, VB de 0,3 mm

Los resultados de las mediciones de fuerza de corte y de avance, para la velocidad de 250 m/min, son presentados en la Fig. 9, y también aqui no se verifica el efecto sensible de la posición de la capa maquinada. La variación máxima de las fuerzas, considerando un mismo avance, fue del orden de 7%, que puede ser considerado un valor relativamente normal para este tipo de experimento. La fuerza específica de corte $k_{c1.1}$, según el método de Quienzle (KOENIG, 1981), tiene un valor de 949 N/mm^2 para la primera capa, 996 N/mm^2 para la segunda capa y 928 N/mm^2 para la tercera capa, representando igualmente una diferencia del orden de 7% entre los valores extremos. La fuerza de corte **(F_c)** se encuentra, en este caso, siempre en una escala superior a la de la fuerza de avance **(F_f)**, en una proporción de 1,5:1 para los avances menores y 2:1 para los avances mayores. Esta tendencia también ha sido constantada por otros investigadores en otros materiales.

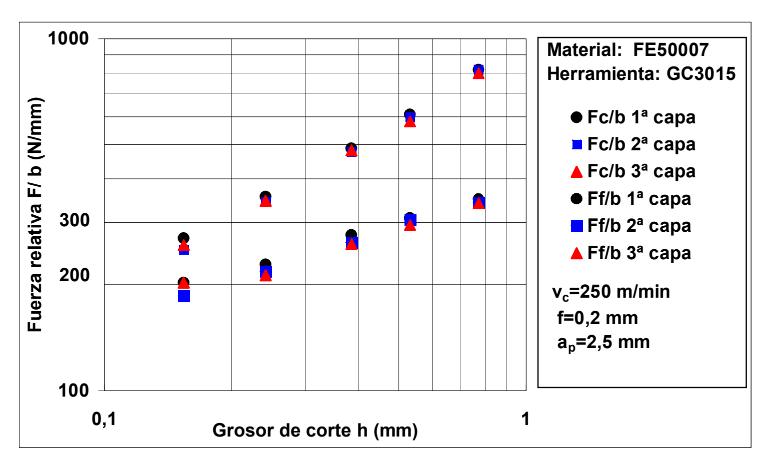


Fig. 9: Fuerza de corte (F_c) y fuerza de avance (F_f) para las tres capas del perfil de hierro fundido nodular FE-50007

Aparentemente, las variaciones micro-estructurales a lo largo de la sección de la barra produjeron efectos que se compensaron, desde el punto de vista del desgaste de la herramienta y de fuerzas involucradas. No se registró aqui también efecto sensible de la presencia de islas de cementita sobre la tasa de desgaste de la herramienta, por lo menos en matriz predominantemente ferrítica.

El efecto del tipo de herramienta, o sea, de la clase de metal duro, puede ser observado en la Fig. 10. La herramienta GC3015, metal duro con revestimiento de nitrato de titanio, presentó resultados superiores a las herramientas GC4025 (metal duro con revestimiento interno de carbonitrato de titanio y revestimiento externo de óxido de aluminio) y GC4015 (metal duro con revestimiento interno de nitrato de titanio y revestimiento externo de óxido de aluminio).

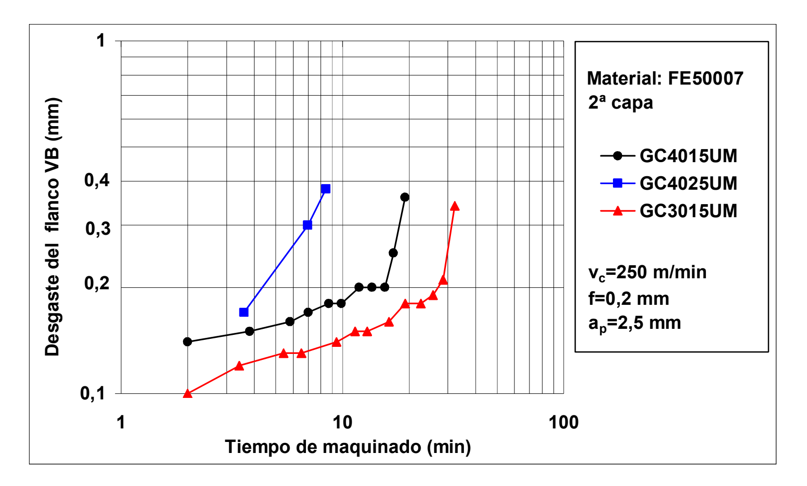


Fig. 10: Desgaste del flanco en función del tiempo de maquinado, para las diferentes herramientas de metal duro probadas

Para un desgaste de flanco de 0,3 mm y velocidad de corte de 250 m/min, la vida de la herramienta GC3015 presentó relaciones de 4,5:1 y 1,7:1 al compararla con la vida de las herramientas GC4025 y GC4015, respectivamente. Estos resultados están de acuerdo con las sugerencias del fabricante de herramientas y contribuyen así para la correcta selección de la herramienta de corte.

Los resultados de la Fig. 9 pueden aún ser utilizados para establecerse estimativas del tiempo de vida de una herramienta, considerandose el criterio de fin de vida de un desgaste de flanco (VB) de máximo 0,3 mm. Tal criterio es considerado adecuado para herramientas con revestimiento, ya que por encima de este valor existe un riesgo elevado para rapida falla completa de la herramienta, principalmente para las mayores velocidades de corte.

CONSIDERACIONES FINALES

Se constató que entre los tres tipos de metal duro, GC3015, GC4015 y GC4025, utilizados en esta investigación para maquinar el hierro fundido nodular FE-50007 vía proceso de torneado, el primero presentó una nítida superioridad. Se debe destacar en el entanto, que estos tres tipos de herramientas no poseian la misma forma de rompe viruta. Esto significa que en escala industrial el GC3015 también debe proporcionar los mejores resultados, ya sea desde el punto de vista económico o técnico, cuando son mantenidas las condiciones de maquinado utilizadas en la presente investigación.

Se verificó que para el GC3015 es posible trabajar con velocidades en la faja de 225 a 280 m/min, resultando que la vida para las herramientas se encuentra en la faja de 13 a 48 min, dependiendo de la velocidad y de la capa en que fuera maquinado el material. En este trabajo se utilizó el avance de 0,2 mm y la profundidad de corte de 2,5 mm, valores similares a los utilizados en producción industrial. Se debe considerar también que, para un gran número de tipos de piezas producidas por la industria metal-mecánica, el maquinado ocurre apenas en la parte que en este trabajo fue denominada capa externa de los perfiles, y que merecen un estudio bastante detallado.

En lo que se refiere al desgaste de las herramientas, se verificó que para un desgaste de flanco (VB) a partir de 0,2 mm, ocurre un aumento brusco en la tasa de desgaste, hecho que está asociado a la perdida del revestimiento y, por tanto, aumento de la exigencia térmica y fricción en las partes de la herramienta donde esto ocurra.

Por esto, para altas velocidades de corte, valores de VB superiores a 0,3 mm deben ser usados con cautela, pues pueden llevar la herramienta facilmente al colapso.

La variación de microconstituyentes y de la microdureza del material a lo largo de la sección del perfil no se revelaron factores críticos, tanto sobre el desgaste de la herramienta como sobre las fuerzas de corte y de avance.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en asociación entre el grupo CIMM (www.cimm.com.br) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina y las empresas: Indústria de fundição Tupy de Joinville, SC, y SANDVIK – Coromant, SP, Brasil. Los autores agradecen a las empresas y a sus funcionários, directa e indirectamente involucrados con la presente investigación.

REFERENCIAS

ASM - Metals Handbook. Properties and selection: Iron and Steels. Ohio: Committee on ductile iron, 1978. 9th edition. Vol. 1.

BOEHS, L. Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico. Florianópolis, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecância, Universidade Federal de Santa Catarina. 105 p.

DE AGUIAR, Cícero G. Análise da usinabilidade do ferro fundido nodular de fundição contínua ABNT FE-50007. Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecância, Universidade Federal de Santa Catarina. 107 p.

FATAHALLA, N., and BAHI, S. Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile cast iron. Chapman & Hall, 1996.

FUCO Manual técnico. Perfis de fundição contínua. Joinville: Indústria de fundição tupy, 1998.

ISO 3685. Internacional Organization for Standardization tool life testing with single point turning tools. Switzerland: 1977.

KÖNIG, W. Fertigunsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren. Band 1, VDI-Verlag, 1981, p. 168-178.

MARGERIE, J. C. Facteurs metalurgiques de l'usinabilité des pièces en fonte. Fonderie, nº 303, 1971.

SANDVIK-Coromant. Ferramentas para torneamento. C-1000:5-POR. Dezembro, 1995, p. 1-417.

SANDVIK-Coromant. Corokey - Torneamento, Fresamento e Furação. C-2903:3-POR. Janeiro, 1997, 161 p.

SOUZA, A. B. S., and CASTELO BRANCO, C. H. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. São Paulo: IPT, 1977

WALTON, C.N. Iron Castings Handbook. Gray and Ductile Iron Founders Society, 1971.